引文格式：李文山, 李轶波. 不同IGS精密产品对BDS评估ZTD差异性分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(4): 118-122. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.04.030

不同IGS精密产品对BDS评估ZTD差异性分析

李文山[1]，李轶波[1]
（1. 山西华冶勘测工程技术有限公司，山西 太原 030000）

摘　要：分析了ESA、GBM以及WUM 3种精密产品在精密单点定位以及天顶对流层延迟评估中的差异性。实验结果表明，BDS采用3种精密产品解算得到的精密单点定位精度都在cm级，但是采用GBM产品解算精度最优，其次为ESA产品，最低为WUM产品。采用ESA、GBM2种精密产品均能精确评估出ZTD值随历元变化情况，其中静态精密单点定位评估ZTD估值RMS差值均在mm级，而动态精密单点定位GBM产品评估ZTD估值RMS差值在mm级，ESA产品评估ZTD估值RMS差值在cm级，但WUM产品不适合进行ZTD值评估。

关键词：IGS精密产品；BDS；精密单点定位；对流层延迟
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）04-0118-05

Difference Analysis of Different IGS Precision Products on the BDS Assessment ZTD

LI Wenshan[1], LI Yibo[1]
(1. Shanxi Huaye Survey Engineering Technology Co., Ltd., Taiyuan 030000, China)

Abstract: In this paper, we used BDS precision single-point positioning technology to compare and analyze the three precision products of ESA, GBM and WUM in precision single-point positioning, and differences in positioning and assessment of zenith tropospheric delay(ZTD). The experimental results show that the precision single-point positioning accuracy obtained by BDS using three types of precision products are all at cm level, but the GBM product has the best solution accuracy, followed by ESA products, and the lowest is WUM products. Using ESA and GBM two kinds of precision products can accurately evaluate the change of ZTD value with epoch. Among them, the RMS difference of static precision single-point positioning assessment ZTD is in the mm level, and the RMS difference of dynamic precision single-point positioning GBM product assessment ZTD is at the mm level, and the ESA product assessment ZTD is at the cm level, but the WUM product is not suitable for assessment ZTD.

Keywords: IGS precision product, BDS, precise single-point positioning, tropospheric delay

天顶对流层延迟（ZTD）是GNSS定位中的主要误差源之一，一般通过参数估计或者对流层延迟改正模型进行改正，而精密单点定位技术是评估天顶对流层延迟最常用的方法[1-3]。该方法操作简单便捷，只需要一个GNSS跟踪站即可实现定位，再采用精密星历与钟差产品，定位精度可以达到厘米甚至毫米级[4-6]。在精密单点定位数据解算中，精密星历与钟差产品是非常重要的一部分，当前提供精密产品的IGS机构较多，而能提供BDS（包括BDS-2和BDS-3）精密产品的机构主要有ESA（欧空局）、GBM（德国波茨坦地学研究中心)和WHU（武汉大学）等[7-8]。当前分析不同精密产品对精密单点定位的影响以及研究精密单点定位评估对流层延迟的能力都是分开进行的，并未结合分析[9-13]。因此，本文基于全球均匀分布的6个MEGX站数据，对比分析了不同精密产品评估对BDS评估天顶对流层延迟的差异性。

1　数学模型

1.1　无电离层精密单点定位模型

精密单点定位采用精密星历和钟差消除轨道误差和卫星钟差误差，对流层、潮汐、固体潮等通过模型改正，而电离层通过无电离层组合进行改正，无电离层组合模型一般表示如下[6,14,15]：

收稿日期：2021-11-28；修回日期：2022-12-27。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（41201193）。
第一作者简介：李文山（1990—），工程师，从事工程测量工作，E-mail：liwenshanlml@163.com。

$$\begin{cases} P_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{C,i}} = \rho^{\mathrm{i}} + \mathrm{c}\,\mathrm{d}\,t^{\mathrm{i}} - \mathrm{c}\,\mathrm{d}\,\tilde{t}_{\mathrm{r,C}} + m(i)\delta_{\mathrm{zwd}} + \varepsilon_{P_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{C,i}}} \\ \Phi_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{C,i}} = \rho^{\mathrm{i}} + \mathrm{c}\,\mathrm{d}\,t^{\mathrm{i}} - \mathrm{c}\,\mathrm{d}\,\tilde{t}_{\mathrm{r,C}} + m(i)\delta_{\mathrm{zwd}} + \lambda_{\mathrm{i}}\tilde{N}^{\mathrm{i}} + \varepsilon_{\Phi_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{C,i}}} \end{cases} \tag{1}$$

式中，C为BDS系统；i为BDS卫星；r为地面GNSS跟踪站；IF为无电离层组合频率；$P_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{C,i}}$为无电离层组合伪距观测值；$\Phi_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{C,i}}$为无电离层组合载波相位观测值；$\rho^{\mathrm{i}}$为地面跟踪站至卫星之间的几何距离；c为真空中光速；dt^{i}为卫星钟差；$d\tilde{t}_{\mathrm{r,C}}$为吸收了接收机端的伪距硬件延迟误差的收机钟差；$m(i)$为天顶对流层湿分量延迟的投影系数；$\delta_{\mathrm{zwd}}$为天顶对流层湿分量延迟；$\lambda_{\mathrm{i}}$为卫星信号波长；$\tilde{N}^{\mathrm{i}}$为吸收了相位的硬件延迟误差模糊度；$\varepsilon_{P_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{C,i}}}$为伪距观测噪声；$\varepsilon_{\Phi_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{C,i}}}$为载波相位观测噪声。

1.2　随机模型

本文采用高度角随机模型进行定权，利用公式表示为[16]：

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_0^2}{\sin^2 E} \tag{2}$$

式中，E为卫星高度角；σ_0为单位权方差。

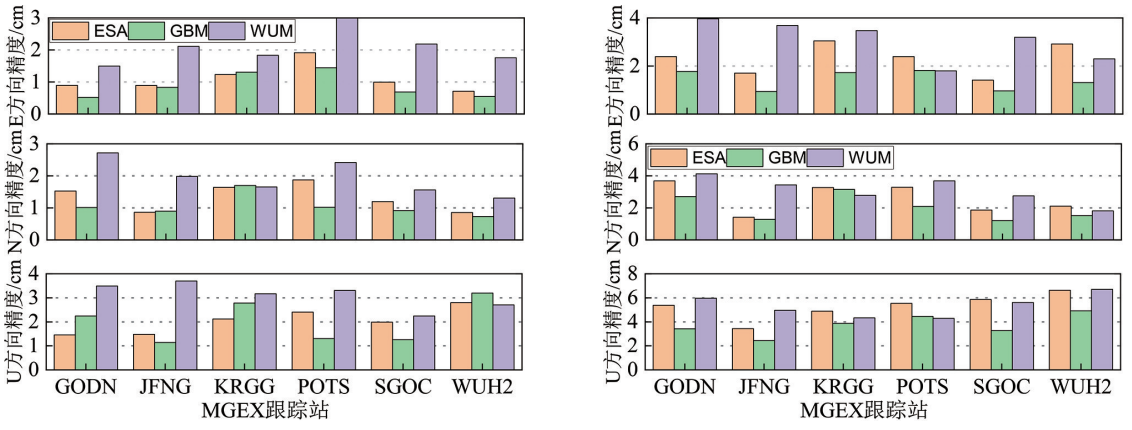
2　实验分析

2.1　数据解算基本情况介绍

为减少实验结果的随机性，选取了6个MGEX跟踪站（GODN、JFNG、KRGG、POTS、SGOC、WUH2）连续7 d的数据进行解算，观测时间为2021-03-01~2021-03-07，采样间隔为30 s。解算系统为BDS，解算频率为B1I/B3I组合，采用的精密星历与钟差共计3种，分别为ESA（欧空局）、GBM（德国波茨坦地学研究中心）和WHU（武汉大学）提供的精密产品。

2.2　精密单点定位精度分析

图1给出了连续7 d每个跟踪站精密单点定位精度，分别为E、N、U 3个方向分量。从图1可以看出，采用ESA和GBM精密星历与钟差解算BDS静态精密单点定位精度优于WUM产品，E方向和N方向定位精度优于3 cm，U方向精度优于4 cm。采用GBM精密星历与钟差解算BDS动态精密单点定位精度优于WUM和ESA产品，E方向和N方向定位精度优于4 cm，U方向精度优于7 cm。



a 静态　　b 动态

图1　采用不同精密产品解算BDS精密单点定位精度

表1采用3种精密产品解算BDS精密单点定位精度平均值，通过表1可以看出，采用GMB解算BDS静态和动态精密单点定位精度最优，静态精密单点定位E方向精度优于1 cm，N方向精度优于1.1 cm，U方向精度优于2 cm；动态精密单点定位E方向和N方向精度优于2 cm，U方向精度优于4 cm。其次解算精度较优的为采用ESA解算结果，静态精密单点定位E方向和N方向精度优于1.5 cm，U方向精度优于2.1 cm；动态精密单点定位E方向和N方向精度优于3 cm，U方向精度优于5.5 cm。采用WUM解算精度最低，静态精密单点定位E方向精度优于2.1 cm，N方向精度优于2 cm，U方向精度优于3.5 cm；动态精密单点定位E方向和N方向精度优于3.1 cm，U方向精度优于5.5 cm。

表1　采用不同精密产品解算BDS精密单点定位精度平均值

模式	精密产品	RMS/cm		
		E	N	U
静态	ESA	1.106	1.326	2.042
	GBM	0.890	1.045	1.986
	WUM	2.063	1.941	3.102
动态	ESA	2.310	2.601	5.284
	GBM	1.421	1.992	3.729
	WUM	3.066	3.099	5.310

2.3　ZTD评估

图2和图3分别给出了采用静态与动态精密单点

定位评估ZTD值随历元变化序列，通过图2和图3可以发现，除SGOC和WUH2站外，其余测站BDS采用ESA和GBM精密产品解算得到的ZTD估值随历元变化与IGS产品的一致性较好，但BDS采用WUM精密产品解算得到的ZTD估值随历元变化波动较大，不适合进行ZTD估值的提取。SGOC和WUH2站ZTD估值与IGS产品相差较大，可能是因为与这两个测站高程方向定位结果发散有关[9]。

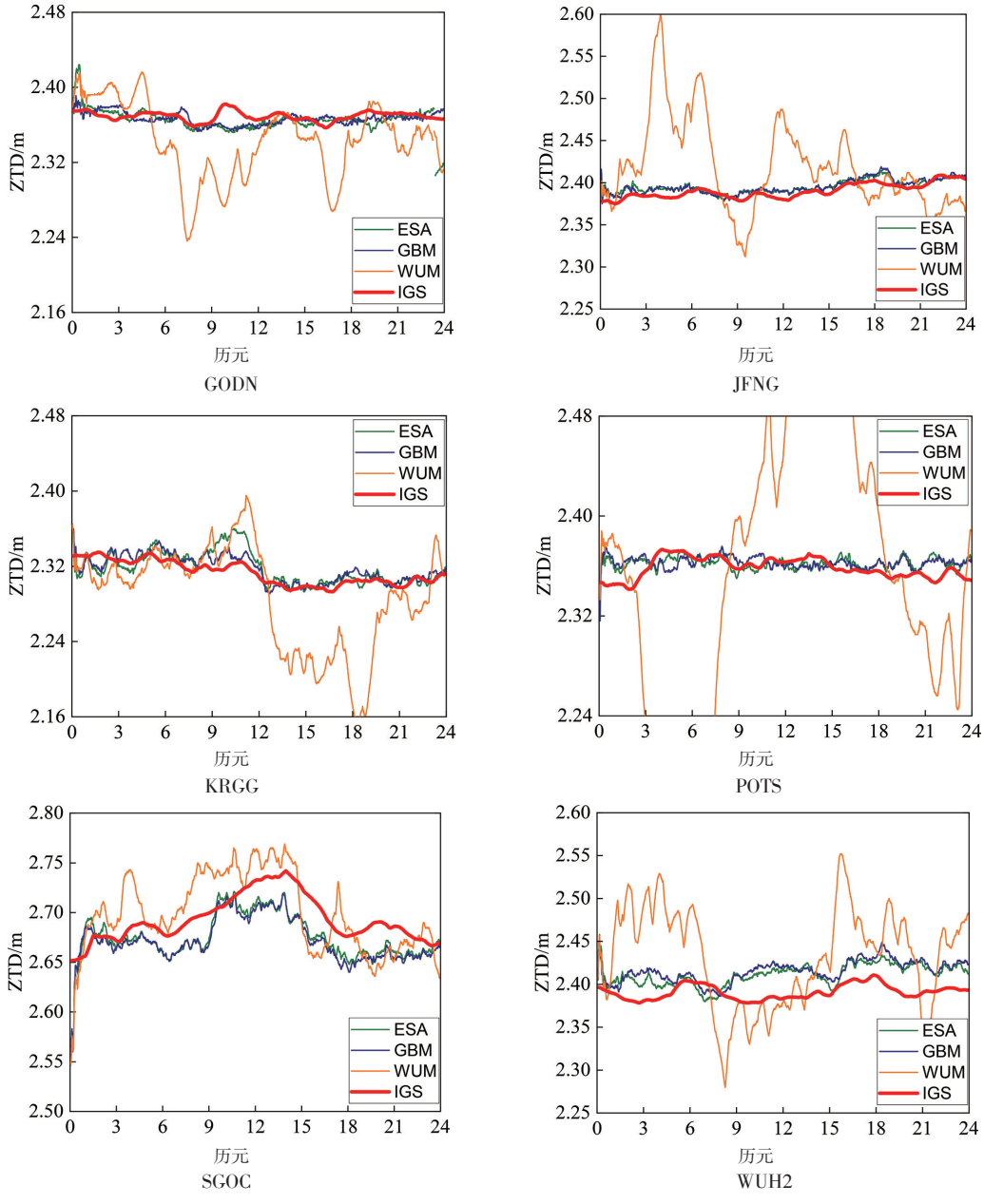


图2 采用不同精密星历BDS静态精密单点定位评估ZTD值随历元变化

图4给出了各测站评估ZTD误差RMS值，通过图4可以看出，采用3种精密产品解算得到的ZTD估值误差RMS基本一致，都在3 m以内，但SGOC站RMS值要略大于其他测站，这可能是因为受该测站观测环境以及自身硬件设施的影响。

为进一步分析采用3种精密产品评估ZTD值的差异性，对于静态精密单点定位评估结果，除SGOC和WUH2站外，采用ESA和GBM精密产品解算得到的ZTD估值RMS差值在1 cm以内，而其余情况解算得到的ZTD估值RMS差值在cm级，但采用3种精密产品解算得到的ZTD估值平均RMS差值都在mm级。对于动态精密单点定位评估结果，除SGOC和WUH2站外，采用GBM精密产品解算得到的ZTD估值RMS差值在1 cm以内，而其余情况解算得到的ZTD估值RMS差值在cm级，但采用ESA和GBM 2种精密产品解算得到的ZTD估值平均RMS差值都在mm级，采用WUM精密产品解算得到的ZTD估值平均RMS差值都在cm级。

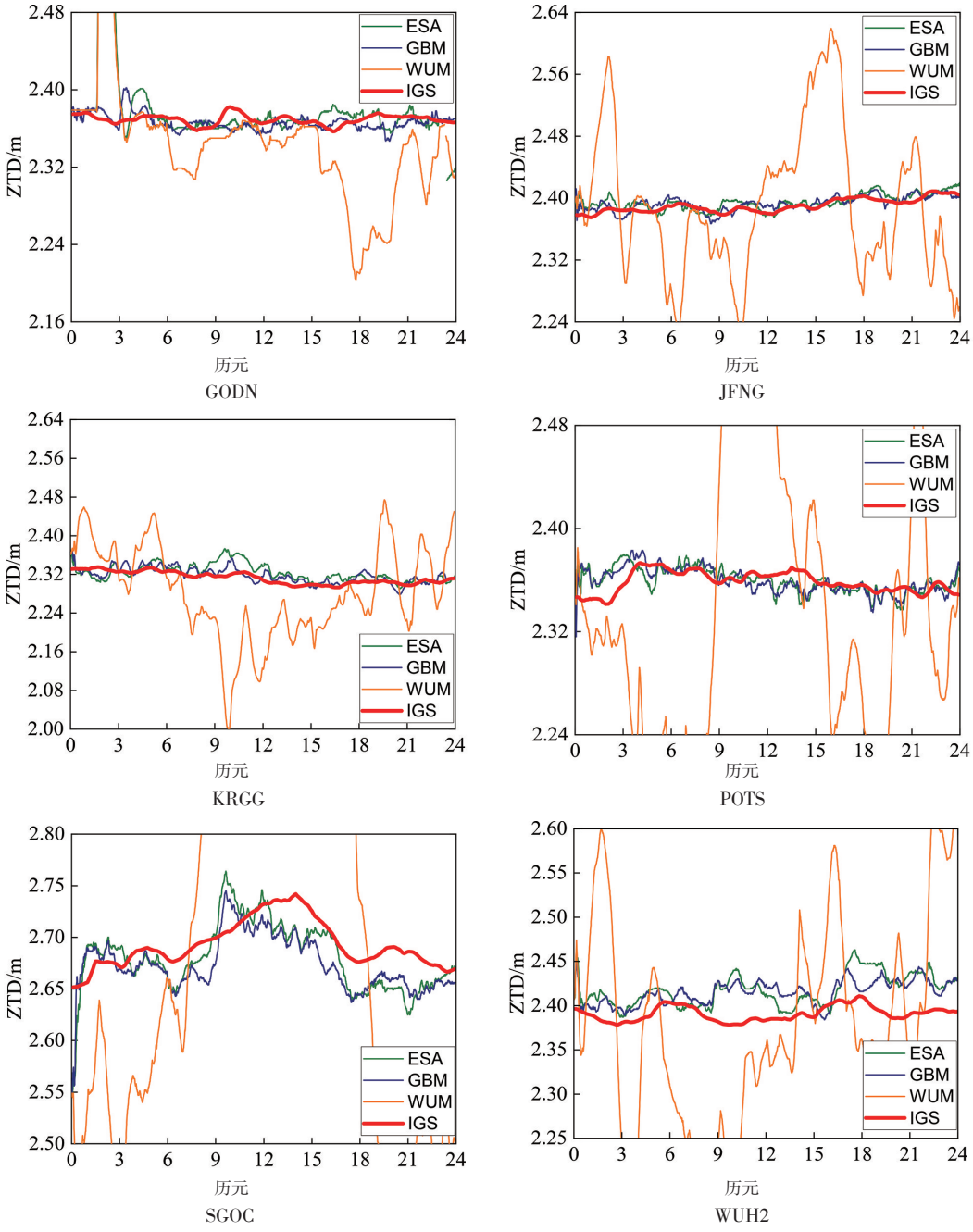


图3　采用不同精密星历BDS动态精密单点定位评估ZTD值随历元变化

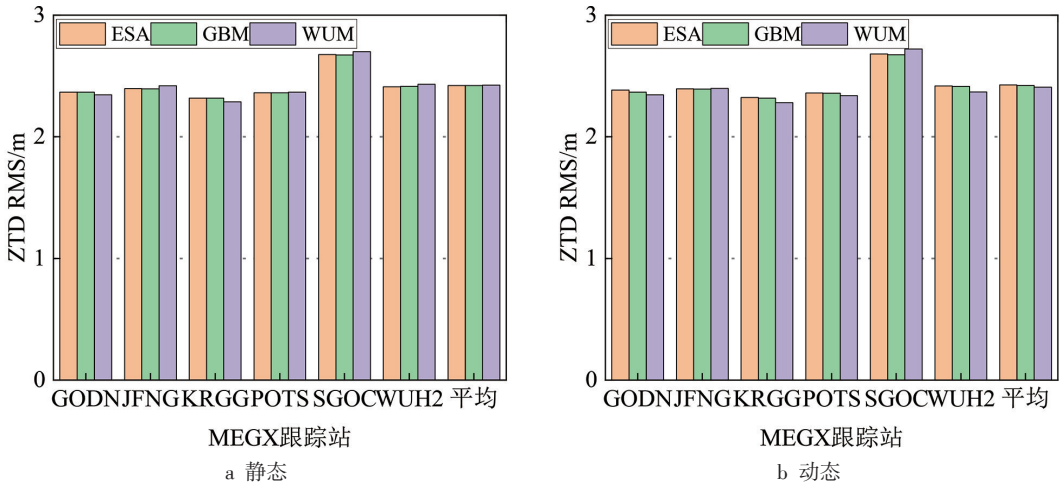


图4　采用不同精密产品BDS精密单点定位评估ZTD RMS值

3 结 语

本文相比当前的相关的研究，不仅分析了不同精密产品对BDS精密单点定位的影响，而且进一步分析了不同精密产品对评估ZTD值的影响，经实验分析得到如下结论：①在精密单点定位精度方面，采用3种精密产品解算得到的定位精度都在cm级，其中采用GBM产品解算得到的定位精度最高，其次为ESA精密产品，精度最低的为WUM产品。②在评估ZTD值方面，静态精密单点定位采用ESA和GBM精密产品评估ZTD值相当，能精确评估出ZTD值随历元变形情况，ZTD估值平均RMS差值都在mm级，WUM精密产品不适合进行ZTD值评估。动态精密单点定位采用ESA和GBM精密产品都能精确评估出ZTD值随历元变形情况，但采用GBM精密产品得到的ZTD估值平均RMS差值在mm级，采用ESA精密产品得到的ZTD估值平均RMS差值在cm级，WUM精密产品不适合进行ZTD值评估。

参考文献

[1] 高兴旺,李付岗,张秋昭,等. 大型桥梁桥塔监测的GNSS相对对流层延迟估计[J]. 测绘科学,2021,46(2):42-47

[2] 王瑾芳,杨玲. 对流层延迟对GNSS单点定位影响的全球评估[J]. 大地测量与地球动力学,2020,40(11):1 194-1 199

[3] 王朝阳,邢喆,周兴华,等. 沿海GPS/GLONASS提取天顶对流层延迟方法研究[J]. 大地测量与地球动力学,2019,39(6):629-633

[4] 秦世民,姜友谊. 不同卫星星历和钟差对精密单点定位影响研究[J]. 甘肃科技,2018,34(24):12-15

[5] 刘赞,陈西宏,刘强,等. 数据融合的对流层天顶延迟估计方法[J]. 宇航学报,2020,41(5):586-591

[6] 丁宁. 不同IGS精密产品对PPP收敛速度影响分析[J]. 测绘与空间地理信息,2021,44(3):79-82

[7] 程赟,来凯. 不同分析中心精密产品的比较与分析[J]. 矿山测量,2019,47(5):35-39

[8] 张士柱,李莎莎,肖伟,等. 利用Multi-GNSS估计天顶对流层延迟[J]. 地理空间信息,2019,17(5):68-72

[9] 鄂盛龙,周刚,龙海,等. BDS全球定位服务能力及天顶对流层延迟估计性能评估[J]. 大地测量与地球动力学,2021,41(8):789-794

[10] 杨军建,姚宜斌,许超钤,等. 不同在线PPP技术得到的ZTD对比与精度分析[J]. 测绘地理信息,2015,40(6):11-14

[11] 毛玉辉,岳忠奇,谢斌斌,等. GPS/Galileo实时天顶对流层延迟估计研究[J]. 大地测量与地球动力学,2019,39(7):728-732

[12] 何一辛,李浩军,周晋. 不同IGS分析中心产品精密单点定位结果分析[J]. 导航定位学报,2020,8(1):38-42

[13] 楼楠,闫志闯,车通宇. 两种精密星历对精密单点定位解的影响分析[J]. 测绘技术装备,2018,20(3):28-31

[14] 王利军,焦文海,贾小林,等. BDS-3精密单点定位性能比较分析[J]. 大地测量与地球动力学,2021,41(4):357-361

[15] 刘生锋,杨文龙,谷涛. BDS-3双频组合精密单点定位精度分析[J]. 测绘通报,2021(3):7-11

[16] 蒋欠欠,郭英,于杰. BDS/GPS组合系统在不同随机模型下的精度分析[J]. 海洋测绘,2019,39(1):70-74

本刊声明

为适应我国信息化建设，扩大本刊及作者知识信息交流渠道，本刊数据已被《中国核心期刊（遴选）数据库》《CNKI 中国期刊全文数据库》和《中文科技期刊数据库（全文版）》等收录。在《地理空间信息》发表的论文均默认将其在著作权保护期内的复制权、发行权、汇编权、翻译权以及网络传播权授权给《地理空间信息》编辑部，编辑部可将上述权利转授给第三方使用。作者不再许可他人以任何形式使用该篇论文，但可以在其后续作品中引用（或翻译）该论文中部分内容或将其汇编在作者的非期刊类文集中。如不同意，请事先声明，本刊另作处理。其文章的著作权使用费与本刊稿酬一次性给付（已在收取发表费时折减和换算为杂志赠阅）。

（本刊编辑部）